

Elektrik güç sistemlerinde harmonik kaynaklarının yerinin saptanması

Oben DAĞ*, Ömer USTA, Canbolat UÇAK

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Modern elektrik güç sistemlerinde harmonik bozulma seviyesinin belirlenmesi, enerji dönüşümünde kullanımı gün geçtikçe artan doğrusal olmayan cihazlar nedeniyle ilgi konusudur. Elektrik güç sistemine doğrusal olmayan yüklerin enjekte ettiği akım harmonikleri, besleme geriliminde harmonik gerilim bozulmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda elektrik enerjisinin üretim, iletim ve kullanım etkinliğinde azalma; elektrik şebekesindeki yalıtkanların ömürlerinde azalma; elektrik şebeke bileşenlerinin işlevlerini kaybetmesi; elektrik güç sağlayıcı transformatörlerinin, elektrik gücü taşıyan iletkenlerin ve diğer cihazların aşırı ısınması sorunları oluşur. Elektrik güç sistemlerinde harmonik bozulmaya neden olan etkenlerin yerinin saptanması, harmonik seviyelerinin düşürülmesi çalışmalarının verimliliğini arttırabilir. Ayrıca harmonik bozulma seviyelerinin düşürülmesi için gerekli harmonik filtreleme gibi uygulamalar daha etkin olarak yapılabilir. Bununla birlikte, besleme gerilimini bozarak elektrik güç sisteminin etkinliğini azaltan sorumlu taraflar cezalandırılabilir. Bu çalışmada, öncelikle iki-uçlu empedans-tabanlı arıza yer tespit etme metoduna örnekseme yapılarak harmonik kaynak yeri tespit etme yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda, harmonik kaynağı ile ölçüm alınan noktalardan biri arasındaki mesafe bir ölçüt olarak kullanılarak bir harmonik kaynağının yeri tespit edilmektedir. Bu çalışmada ayrıca empedans devreleri yaklaşımına dayanan bir harmonik kaynağı yeri saptama ve özgün bir ölçü aletlerini en iyi yerleştirme yöntemi (ÖEYY) geliştirilmiştir. 30-baralı IEEE test sistemi ile yapılan Monte Carlo benzetimleri, geliştirilen yaklaşımın harmonik empedansları değişimlere maruz kaldığında bile doğruluğunu ve performansını onaylamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrik güç sistemleri, harmonikler, kaynak yeri saptama, ölçü aletlerini en iyi yerleştirme.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Oben DAĞ. obendag@gmail.com; Tel: (216) 578 04 72.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Elektrik güç sistemlerinde harmonik kaynaklarının yerinin saptanması" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 08.01.2010 tarihinde dergiye ulaşmış, 09.03.2010 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.06.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Dağ, O., Usta, Ö., Uçak, C., (2011) 'Elektrik güç sistemlerinde harmonik kaynaklarının yerinin saptanması', İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 10: 1, 111-122" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

Locating harmonic sources in electrical power systems

Extended abstract

Harmonic distortion in power systems has been a major concern for a long time. The increase in the use of non-linear devices cause increased harmonic distortion problems in power systems. IEEE Std 519-1992 outlines typical harmonic current limits for customers and harmonic voltage limits for utility supply voltage to minimize the effects of harmonic distortion on the supply and end-user systems. In order to mitigate harmonic problem, the knowledge of the locations of the harmonic sources may be helpful. By locating the harmonic sources, responsible parties may be penalized for causing distortion in the supplied power that result in the loss of efficiency in power systems.

It is assumed in this study that, (i) the network harmonic impedances were obtained prior to analyses; (ii) the power system consists of linear devices; (iii) the distorting device is represented by linear models which inject harmonic currents; (iv) the network is balanced three-phase system and (v) the injected harmonic current levels are independent of the voltage distortion at the device terminals. Last assumption implies that the equivalent circuits of the system at various harmonic frequencies are independent from each other. According to the superposition theory, power system harmonic circuit can be represented as a sum of the circuit with fundamental frequency and the circuits for the other harmonic orders. By solving the system at each frequency, each source and its effect can be considered independently. For a harmonic source with multiple harmonic orders, the harmonic network can be solved at each harmonic order circuit to locate the source.

In this study, a single harmonic source location method in analogy to two-terminal impedance-based fault location approach is developed. The distance from the harmonic source to one of the metering points is used as a measure to locate the single harmonic source. The distance measure can be applied for each harmonic order circuit according to the superposition theory. If a source with different harmonic orders is injected to a bus, all of the results will point to the same bus. Harmonic source impedance and harmonic source current values are not needed for the proposed approach. The required data is system impedance and measurements at each

end nodes of an m-branch n-node network. It is stated that, to correctly locate the harmonic source for an n-node m-branch system, m-measurements (each measurement at each branch end-node) are sufficient. For networks with 2-branch, this measure can be accurately used to locate the harmonic source. On the other hand when the number of branches increases, the problem of correctly defining the distance from any measurement point to the unknown location of harmonic source limits the approach and it is not practically applicable to networks with 3-branch or more.

It is stated that for networks with 3-branch or more, the nodal analysis can be used to locate harmonic sources in the network. For this approach voltage measurements at all of the nodes are required; however this is not cost effective. Therefore, a new optimal meter placement algorithm with impedance-ratio based source location approach is proposed to obtain limited number of meter positions for harmonic source location process. This method uses impedance ratios of harmonic impedance matrix corresponding to measurement pairs obtained by optimal meter placement algorithm. Then, these ratios are matched with voltage ratios at corresponding meter locations to locate the harmonic source. The meter placement approach selects measurement pairs with impedance ratios that have maximum distance between their closest members to overcome the slight deviations in harmonic impedance values. Simulations on IEEE 30-bus test system verify the accuracy of the proposed harmonic source location approach.

Obtaining the exact values of network harmonic impedances may be difficult in practice; hence harmonic source location approach may need to tolerate deviations in network impedance values. For this reason, Monte Carlo simulation is used to analyze the accuracy of the location approach by applying a variety of deviations into the harmonic impedance matrix. It is seen that the performance of location approach with optimal meter placement algorithm is always better than location with arbitrarily selected meter positions. This shows that the proposed optimal meter placement algorithm is capable of dealing with the effects of deviations in network impedance values, which is a practical situation in real life.

Keywords: Power systems, harmonics, source location, optimal meter placement.

Giriş

IEEE Std. 519 (1992) tüketiciler için harmonik akım sınırlarını ve güç sağlayıcılar için gerilim sınırlarını ve bunların harmonik bozulmanın besleme ve son kullanıcı sistemleri üzerinde etkisini en aza indirmek amacıyla uygulanmasını tarif etmektedir. Harmonik bozucu kaynağının yerinin bilinmesi ile elektrik güç sisteminin etkin kullanılmasını engelleyen kullanıcılar saptanarak bir yönetmelik çerçevesinde cezalandırılabilir.

Literatürde görülen indis tabanlı yaklaşımlar elektrik güç sistem indislerini kullanarak kaynak yerini saptamayı amaçlamaktadır. Örneğin yapılan bir çalışmada önerilen yük dengesizlik indisi ve doğrusal olmayan yük indisi genliklerinin, sistemdeki yük dengesizliği ve doğrusallığı seviyeleri ile doğru orantılı değiştiği saptanmıştır (Cristaldi ve Ferrero, 1995). Yine bir çalışmada önerilen global harmonik indisinin çeşitli değerleri için, ölçüm alınan noktada harmonik kaynağı bulunmaması, harmonik kaynağının yük tarafında olması ve harmonik kaynağının güç sağlayıcı tarafında olmasının saptanabileceği gösterilmiştir (Cristaldi vd., 2002). Bu yaklaşımlar tekil harmonik aktif güç akış yönüne dayanmaktadır. Harmonik aktif güç akışına dayanan yaklaşımlar (CIGRE 36.05, 1999) dışında farklı harmonik indislere ve aktif olmayan güç tanımlarına dayanan yöntemler de geliştirilmiştir (IEEE Std. 1459, 2000; Emmanuel, 1995; Xu vd., 2003; Cataliotti vd., 2008).

Literatürde görülen bir diğer yaklaşım ise harmonik durum kestirimidir (HDK). Burada amaç sınırlı ölçüm verisi ile sistemdeki harmonik seviyelerini en iyi şekilde belirlemektir (Heydt, 1989). Najjar ve Heydt (1991) ilk olarak en küçük kareler tahmin yöntemine dayalı kestirim metodu fikrini kullanarak bir statik harmonik durum kestirim yöntemi önermiştir. Beides ve Heydt (1991) ise dinamik harmonik durum kestirimi için Kalman filtre yöntemini önermiştir. Fakat bu yöntemlerde kullanılacak ölçü aleti sayısı işlem maliyetini arttırmaktadır. Farach ve diğerleri (1993) ise ölçü aleti yerleştirme sorununu çözmek gayesiyle, sezgisel olarak harmonik kaynaklarının yerleri hakkında ön tahminler

yapmaya dayanan bir ölçü aleti en iyi yerleştirme metodu önermiştir. Fakat bu yöntem en iyi, sistemdeki yüklerin yapısı hakkında ön bilgi olduğunda çalışmaktadır.

HDK yaklaşımı gereğinden fazla harmonik ölçümleri ile sistem parametreleri hakkında detaylı ve doğru bilgiye ihtiyaç duyar. Sistem hakkında yetersiz bilgi olması halinde sonuçlarda büyük hatalar oluşmaktadır. Gürsoy ve Niebur (2009) bağımsız bileşen analizi (BBA) olarak bilinen bir istatistiksel işaret işleme tekniği ile eğer akım harmonikleri istatistiksel olarak birbirinden bağımsız ise, sınırlı harmonik gerilim ölçümü kullanarak ve sistem admitanslarına ihtiyaç duymaksızın akım işaretlerinin kestirilebileceğini ileri sürmektedir. Bununla birlikte bu çalışma, sistemde hatalı ölçme ya da hatalı veri olması durumunda tanımlama doğruluğunun ne şekilde değişeceği sorusunu yanıtlamamaktadır. Baghzouz ve diğerleri (1998) düşük yük seviyelerinde, ölçüm hatasının kestirim doğruluğunu azalttığını rapor etmişlerdir. Bundan başka, ölçü aleti miktarının ve yerinin geliştirilen algoritma üzerine etkisi de incelenmemiştir. Ayrıca, algoritma sistemdeki harmonik kaynaklarının nitelikleri hakkında bilgiye gereksinim duymaktadır ve ölçü aleti sayısı sistemdeki harmonik kaynağı sayısına göre seçilmiştir. Son olarak kullanılan FastICA algoritması sistemde bulunan harmonik kaynaklarının sayısına ihtiyaç duymaktadır ki bu bilgi mevcut olmayabilir.

HDK çalışmalarında ölçüm maliyetini azaltmak için ölçü aleti sayısının sınırlandırılması gerekmektedir. Fakat kestirim kalitesi ölçü aletlerinin yerine bağlı olarak değişmektedir. Yapay sinir ağları (YSA) ve bulanık kümeleme (BK) gibi sezgisel yaklaşımlar harmonik kaynağının yerini belirlemek amacıyla bu tür uygulamalarda kullanılmaktadır. Örneğin, Hartana ve Richards (1993) HDK için gerekli ölçümlerin YSA ile sağlanmasını ve bu şekilde ölçü aleti sayısının sınırlandırılmasını önermiştir. Kumar ve diğerleri (2005) de benzer bir yaklaşımla harmonik kaynağı yerini saptamayı önermiştir. YSA' dan başka, bulanık mantık teorisi de bu problem için kullanılmaktadır. Hong ve Chen (1999) birden fazla harmonik kaynaklarının yerinin saptanması için bulanık mantık-YSA tabanlı bir sistem

önermiştir. Geliştirilen yaklaşımın Heydt (1989) ile Najjar ve Heydt (1991) çalışmalarına göre daha az sayıda ölçü aletine ihtiyaç duyduğu ifade edilmiştir.

Yapılan çalışmalar, BK ve YSA yaklaşımlarının harmonik kaynak yeri bulma konusunda yaygın olarak kullanıldığını göstermektedir. Bununla birlikte bir YSA'nın eğitim sürecinin uzun olması ve yakınsamanın garanti olmaması, uygun ağ mimarisinin kurulma zorluğu ve harmonik kaynakları hakkında ön bilgiye ihtiyaç duyulması karşılan zorluklardandır.

Yapılan literatür değerlendirmesi sonucu; önerilen yaklaşımların kaynakların türü, sayısı ve özellikleri hakkında ön bilgiye ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Ek olarak hatalı verilerin yer saptama yaklaşımı doğruluğu üzerinde etkilerinin net olarak incelenmesi gerektiği ve bu tür şartlarda bile kaynak yerini doğru saptayabilecek bir yaklaşıma ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmada, sistem harmonik empedans değerlerinde değişim olması halinde bile en uygun ölçü aleti yerlerini belirleyip kaynak yerini doğru olarak saptayabilen bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşımın etkinliği 30-baralı IEEE test sistemi üzerinde benzetim yapılarak saptanmıştır. Son olarak Monte Carlo tekniği kullanılarak geliştirilen algoritmanın empedans değerlerinde değişiklik olması halinde nasıl değiştiği incelenmiştir.

Bu makale şu şekilde düzenlenmiştir. İzleyen bölümde mesafe ölçütüne dayanan bir yaklaşımla harmonik kaynak yeri belirleme yaklaşımının yapısı açıklanmıştır. Daha sonra empedans tabanlı bir yaklaşımla yer saptama ve özgün bir ölçü aleti yerleştirme yöntemi tanıtılmış ve örneklerle etkinliği incelenmiştir. Dördüncü bölümde, algoritmanın etkinliği Monte Carlo yöntemi ile irdelenerek empedans değerlerinde değişim olduğunda yaklaşımın davranışı ortaya konulmuştur. Tüm sonuçlar beşinci bölümde verilmiştir.

Mesafe ölçütü ile yer saptama

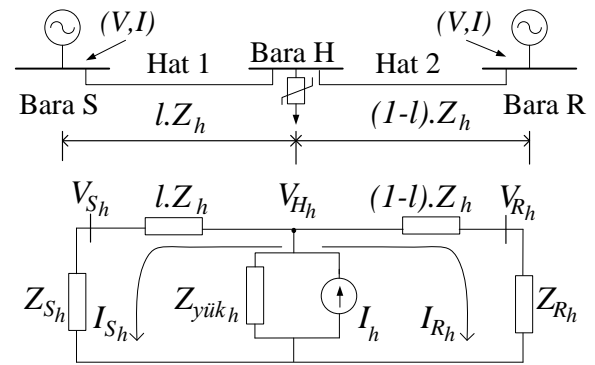
Alternatif akım iletim ve dağıtım hatlarında oluşan bir arızanın yerinin belirlenmesi, elektrik

mühendisliğinin önemli bir sahasıdır. Tek-terminalli ve iki-terminalli empedans-tabanlı metotlar, problem çözümünde kullanılan başlıca yöntemlerdendir (Kesztenovics ve Drazenovic, 1999). Burada, iki-terminalli empedans-tabanlı arıza yeri bulma yaklaşımına benzer şekilde bir harmonik kaynağı yeri belirleme yaklaşımı geliştirilmiştir. Şekil 1, tek bir harmonik kaynağı bulunan bir sistemi ve h dereceli harmonik eşdeğer devreyi göstermektedir.

Şekil 1'de Z_h bara-S ve bara-R arası hat empedansını gösterir. Bilinmeyen l değişkeni bara-S ile bara-H arası mesafedir. Hat empedansının bilinmesi ve besleme noktalarındaki gerilimlerin ve akımların ölçülmesi durumunda bilinmeyen l , Kirchhoff gerilim denklemi ile hesaplanabilir:

$$l = \frac{-V_{S_h} + V_{R_h} + Z_h \cdot I_{R_h}}{Z_h \cdot (I_{S_h} + I_{R_h})} \quad (1)$$

Denklem 1'de V_{S_h} bara-S'de ölçülen harmonik gerilimi, V_{R_h} bara-R'de ölçülen harmonik gerilimi, I_{S_h} hat-1'de ölçülen harmonik akımı, I_{R_h} hat-2'de ölçülen harmonik akımı olmak üzere karmaşık sayılar ve l ise reel sayıdır.



Şekil 1. Harmonik kaynak yeri saptama

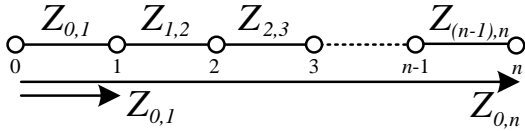
Denklem 1'deki mesafe ölçütü, süperpozisyon prensibinden faydalanan her bir harmonik devresi için ayrı olarak çözülebilir. Eğer farklı harmonik dereceleri içeren bir harmonik kaynağı devreye enjekte edilirse, tüm sonuçlar aynı düğümü işaret edecektir. Fakat ölçüm hataları bu sonuçları değiştirebilir. Bundan başka mesafe ölç-

çütünün hesaplanması için harmonik kaynağı hakkında bilgiye (harmonik kaynak empedansı ve akımı) ihtiyaç duyulmamaktadır.

Şekil 2'deki n -düğümlü bir devre göz önüne alınsın. Şekil üzerinde düğümler arası empedans değerleri gösterilmiştir. Harmonik derecesi kolaylık olması bakımından denklemlerde yazılmamak üzere mesafe ölçütü şu şekilde hesaplanabilir,

$$d = \frac{-V_S + V_R + Z_{TOP} \cdot I_R}{Z_{TOP} \cdot (I_S + I_R)} \quad (2)$$

Burada alt indis S düğüm-0'a, alt indis R düğüm- n 'ye, Z_{TOP} toplam hat empedansına ve n düğüm sayısına karşılık gelmektedir. Ayrıca V_S düğüm-0'da ölçülen gerilim, V_R düğüm- n 'de ölçülen gerilim, I_S hat-(0),(1)'de ölçülen akım, I_R hat-($n-1$),(n)'de ölçülen akım olmak üzere, d harmonik kaynağına olan uzaklığı belirtmektedir.



Şekil 2. n -düğümlü bir devre modeli

Denklem 2'deki mesafe ölçütünün alabileceği değerler kümesi:

$$d = \left\{ 0, \frac{Z_{0,1}}{Z_{TOP}}, \frac{Z_{0,2}}{Z_{TOP}}, \frac{Z_{0,3}}{Z_{TOP}}, \dots, \frac{Z_{0,(n-1)}}{Z_{TOP}}, \frac{Z_{0,n}}{Z_{TOP}} \right\} \quad (3)$$

Denklem 2 ve Denklem 3'den şu bağıntı elde edilebilir:

$$\frac{Z_{0,k}}{Z_{TOP}} = d = \frac{-V_S + V_R + Z_{TOP} \cdot I_R}{Z_{TOP} \cdot (I_S + I_R)} \quad (4)$$

Denklem 4'te k indisi, $k \in [0, n]$ olmak üzere, devredeki düğüm numarasına karşılık gelmektedir.

Bu sonuçlara göre eğer harmonik empedansları biliniirse, kaynak yerinin saptanabileceği görül-

mektedir. Şekil 2'deki devre için 4 ölçüm gerektiği görülmektedir (her iki uçtan akım ve gerilim işareti). Eğer sistem empedansı ve düğüm gerilimleri bilinirse akım ölçümü yapılmasına gerek kalmaz. Bu incelemelerden iki uçlu bir devrede kaynak yerini bulmak için iki uçtan düğüm gerilim ölçümü alınması gerektiği anlaşılmaktadır.

Eğer iki-uçlu bir devreye bir dal daha eklenirse ve eklenen dal üzerinde herhangi bir düğümde kaynak bulunursa, bunun yerini saptamak için o daldaki uç düğümde de ölçüm almak gerekmektedir. Çünkü eklenen dal üzerindeki tüm düğümler için Denklem 4 ile verilen empedans oranı, bu dal üzerinden ek ölçüm alınmadığında, aynı olacağından kaynağın eklenen dal üzerindeki hangi düğümde olduğu saptanamayacaktır. Dolayısıyla, harmonik kaynağının doğru olarak saptanması için devredeki tüm uç düğümlerde ölçüm alınması gerekmektedir. Genelleme yapılsa, n -düğümlü ve m -dallı bir sistemde kaynak yerini belirlemek için m -ölçüm (her ölçüm her dalın uç düğümünde) alınmalıdır.

Geliştirilen d ve l indisleri sayısal değerlerinde ölçüm hataları nedeniyle değişiklikler olabilir; ama önerilen yöntemin, dal sayısı arttığında (ölçüm alınan herhangi bir noktadan harmonik kaynağına olan) mesafe ölçütünün modellenmesinde oluşan zorluklar sebebiyle incelenmesi sınırlandırılmıştır ve ölçüm hataları durumunda test edilmesine gerek görülmemiştir. Ek olarak birden fazla kaynak için bu denklemi oluşturmak da yine zorluklar içermektedir. Bu durumda daha etkin bir yönteme ihtiyaç duyulmaktadır.

Düğüm analizi yaklaşımı kullanılarak bir mesafe ölçütü indisi oluşturmadan kaynak yeri saptanabilir. n -düğümlü m -dallı bir devre topolojisi için doğrusal olmayan şartlarda sistem eşitlikleri şu doğrusal eşitlikle ifade edilebilir

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Y_{1,1} & \cdots & Y_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n,1} & \cdots & Y_{n,n} \end{bmatrix}_h \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}_h \quad (5)$$

elde edilir. Bu denklemde I_n n -barasına enjekte edilen net akım fazörü, V_n n -barasındaki gerilim

fazörü (ölçümlere karşılık gelen) ve eşitlikteki harmonik admitans matrisi ise \mathbf{Y}_h olmak üzere eğer tüm düğüm gerilimleri ile sistem admitans matrisi bilinirse, Denklem 5 çözüldüğünde Denklem 5'in sol tarafındaki akım vektörü kullanılarak harmonik kaynaklarının yeri saptanabilir. Akım vektöründe, kaynak bulunan satır elemanları sıfırdan farklı olacaktır. Bununla birlikte, tüm düğüm gerilimlerinin bilinmesi pratik olmadığından sınırlı ölçüm ile harmonik kaynağı saptayabilen bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum için geliştirilen yaklaşım bir sonraki bölümde sunulmuştur.

ÖEYY ile yer saptama

Tüm harmonik bara empedans matrislerinin önceden elde edildiği varsayılmak üzere n -düğümlü bir devrede, sistemi belirli bir harmonik derecesinde tanımlayan eşitlikler şu doğrusal denklem takımı ile verilebilir:

$$\begin{bmatrix} V_I^{(h)} \\ \vdots \\ V_n^{(h)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{I,I}^{(h)} & \cdots & Z_{I,n}^{(h)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n,I}^{(h)} & \cdots & Z_{n,n}^{(h)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_I^{(h)} \\ \vdots \\ I_n^{(h)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Burada $V_i^{(h)}$ i -barasındaki gerilim fazörü, $I_i^{(h)}$ i -barasına enjekte edilen net akım fazörü ve eşitlikteki harmonik empedans matrisi ise $\mathbf{Z}^{(h)}$ $bara$ olmak üzere, ölçüm alınan iki düğümdeki gerilim oranı şu denklem ile tanımlanabilir:

$$\frac{V_k}{V_\ell} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_{k,j} I_j}{\sum_{j=1}^n Z_{\ell,j} I_j} \quad (7)$$

Burada ölçüm alınan düğüm çifti (k, ℓ) olarak tanımlanmış ve kolaylık açısından harmonik derecesi denklemde gösterilmemiştir. Devreye tek harmonik kaynağı enjekte edildiğinde Denklem 7'de i . düğüme enjekte edilen hariç diğer tüm akım değerleri sıfır olacaktır. Dolayısıyla Denklem 7, sistemde tek bir harmonik kaynağı olması halinde şöyle yazılabilir:

$$\frac{V_k}{V_\ell} = \frac{Z_{k,i}}{Z_{\ell,i}} \quad (8)$$

Sonuç olarak tek harmonik kaynağının yerini bulma işlemi verilen frekansta ölçülen gerilim oranına eşit olan empedans oranını arama olarak tanımlanabilir.

Yer bulma yönteminin doğru olarak çalışması için devrede doğru ölçümler alınması gerekmektedir. Küresel konumlandırma sistemi (KKS) ile elde edilen, zamanda senkronize edilmiş fazör ölçümleri doğru harmonik ölçümleri almak için kullanılabilir (Phadke, 1993).

Denklem 8'deki empedans oranı bir indis ile tanımlanabilir:

$$\alpha_i^{k,\ell} = \frac{Z_{k,i}}{Z_{\ell,i}} \quad (9)$$

Denklem 9'da alt indis i , kaynağın bulunduğu düğümü göstermektedir ($i = I, \dots, n$).

Bu yaklaşıma benzer bir yaklaşım literatürde görülmüştür (Korovkin vd., 2005). Bu yaklaşımda, keyfi seçilen iki düğümde ölçülen gerilim değerleri oranı olarak tanımlanan bir katsayı, ilgili ölçüm noktalarına karşılık gelen empedans oranı ile karşılaştırılarak kaynak yeri aranmaktadır. Fakat yer bulma katsayısına eşit olan birden fazla empedans oranı durumunda ve harmonik empedans değerleri doğru olmadığında, kaynak yeri bulunamamaktadır.

Elemanları Denklem 9'daki oranlar ile gösterilen empedans oran kümesi,

$$\boldsymbol{\alpha}^{k,\ell} = \{\alpha_1^{k,\ell}, \alpha_2^{k,\ell}, \dots, \alpha_n^{k,\ell}\} \quad (10)$$

olmak üzere bu kümenin tek olup olmamasına göre kaynak yeri saptanabilir yada ek ölçüm alınması gerekir. Eğer Denklem 10 içindeki tüm elemanlar birbirinden farklı ise küme tektir ve kaynak yeri bulunabilir. Fakat eğer en az iki eleman birbirine eşit ise ve kaynak bu elemanların bulunduğu düğümlerde olduğunda, yeri saptanamaz ve bunun için ek ölçüm alınması gerekir.

Bir sistemde bulunan tek kümelerin sayısı devre topolojisine ve empedans değerlerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Sistem topolojisinin empedans oran kümesindeki empedans oranlarını aynı yaptığı durumlarda tek kümeler bulunmayabilir ve birden fazla ölçüm alınması gerekir. Bundan başka sistemdeki harmonik empedans değerleri doğru bir şekilde elde edilememiş olabilir ve kaynak saptama algoritmasının bu durumların üstesinden gelmesi beklenir. Bu problemin çözümü için bir ölçü aletlerini en iyi yerleştirme yöntemi (ÖEYY) geliştirilmiştir.

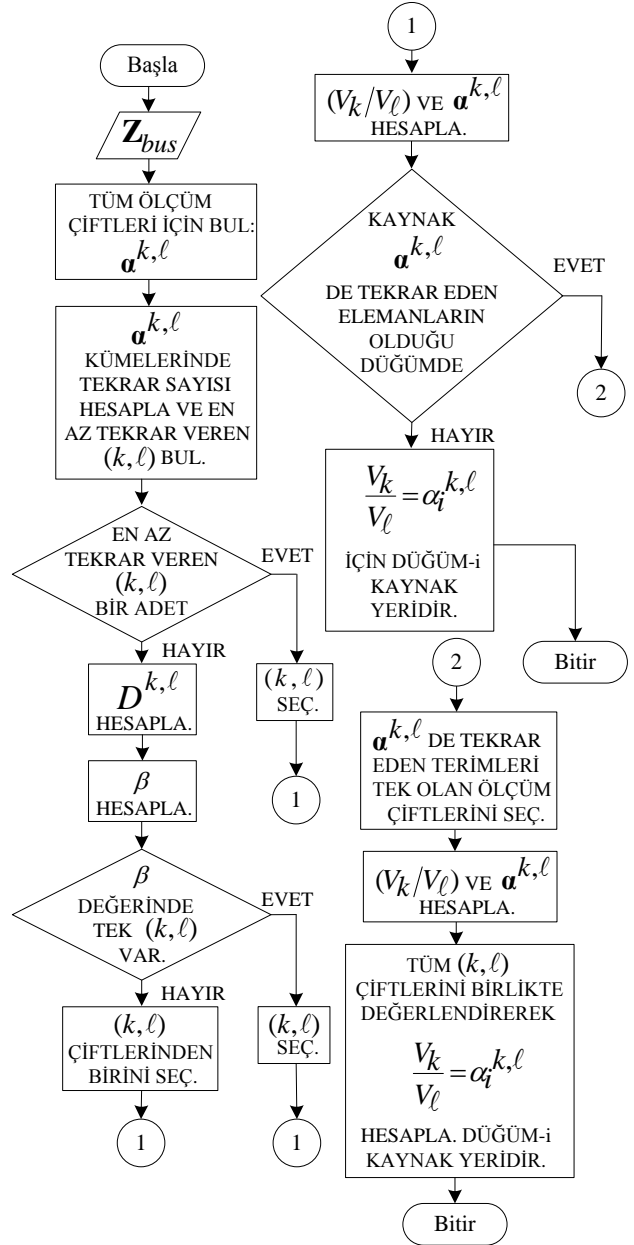
ÖEYY algoritması öncelikle sistemdeki tüm ölçüm çiftleri için elde edilen Denklem 10'daki kümelerde tekrar sayılarını hesaplayarak en az tekrar veren ölçüm çiftlerini arar. Eğer sadece bir ölçüm çifti varsa bu çift en iyi ölçüm çifti olarak seçilir. Harmonik kaynağı, Denklem 10'da tekrar eden empedans oranının bulunduğu düğümde değilse yeri saptanabilir. Fakat tersi durumda ek ölçüm gerekir. Bundan başka, eğer en az tekrar veren birden fazla ölçüm çifti mevcut ise bir en iyileme yöntemiyle ölçüm çiftleri seçilir. Bu durumda, öncelikle bu ölçüm çiftleri için elde edilen ve Denklem 10 ile belirtilen kümelerdeki oranlar arası en küçük mesafe bulunur:

$$D^{k,\ell} = \min_{i,j} (|\alpha_i^{k,\ell} - \alpha_j^{k,\ell}|). \quad (11)$$

Bu denklemde $i \neq j$ geçerlidir. Daha sonra, Denklem 11 ile elde edilen en küçük mesafeler arasında en büyük olanı,

$$\beta = \max_{k,\ell} (D^{k,\ell}) \quad (12)$$

ile belirlenerek ona ait ölçüm çifti belirlenir. Eğer bu tanıma uyan birden fazla çift varsa bunlarda biri seçilir ve daha sonra Denklem 10'da tekrar eden terimleri tek olan (tekrar etmeyen) ek ölçüm çiftleri de aranır. Tüm ölçüm çiftleri birlikte kullanılarak harmonik kaynağı yeri aranır. Akış diyagramı Şekil 3'te verilmiştir. Akış diyagramında harmonik derecesi kolaylık olması bakımından yazılmamıştır ancak algoritma her harmonik derecesi için çalıştırılacaktır.



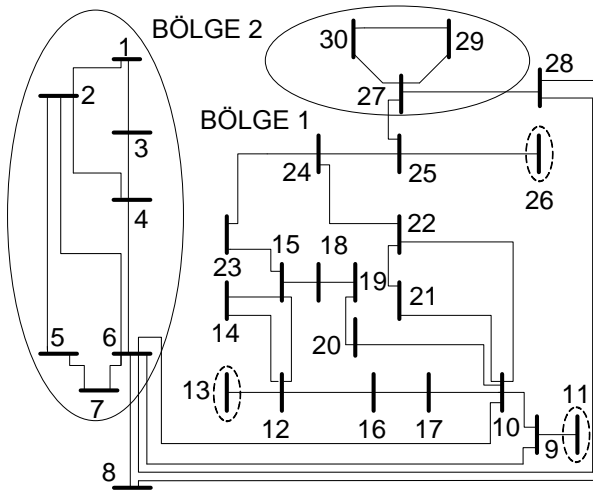
Şekil 3. Kaynak yeri bulma akış diyagramı

Denklem 12'de kullanılan maksimum değer işleviyle, harmonik empedans değerleri değişimlere maruz kalması halinde kaynak yer saptama yaklaşımının etkinliğinin artırılması amaçlanmıştır. Çünkü bu işlev ile birbirine en uzak empedans oranlarını içeren $\alpha^{k,\ell}$ kümesi seçilerek, empedans değişimi olması durumunda algoritmanın $\alpha^{k,\ell}$ elemanları arasında ayırım yapabilmesi sağlanmaktadır.

Geliştirilen algoritmanın işlerliğinin incelenmesi amacıyla yöntem, çeşitli devre topolojileri ile

denenmiştir. Yapılan benzetimler sonucunda ağ topolojisine sahip devrelerde bir ölçüm çiftinin yeterli olduğu, radyal devre topolojisine sahip devrelerde tüm uç düğümlerde ölçüm alınması gerektiği ve hibrit (radyal ve ağ topoloji birleşimi) devrelerde ise (i) eğer devre simetrik değilse sadece uç düğümlerde ve (ii) devre simetrik ise uç düğümler ile devredeki ağ yapı içinde birer ölçüm alınması gerektiği sonucu elde edilmiştir.

Önerilen yöntem Şekil 4'te verilen 30-baralı IEEE test sisteminde de denenmiştir. Sistemin dengeli olduğu varsayılmıştır.



Şekil 4. 30-baralı IEEE test sistemi

Yapılan çalışmada transformatörler kısa-devre empedans modeli, iletim hatları toplu parametre π eşdeğeri ile modellenmiştir. Tüm benzetimler MATHEMATICA 7.0 ortamında yapılmıştır.

Sistemde (sabit akım kaynağı olarak modellenen) harmonik kaynağı bir baraya bağlıdır. İlk 50 harmonik derecesi için yapılan incelemeler sonucunda devrede bölge 1 ve 2'de birer adet, uç düğümlerde üç adet (düğüm-11, düğüm-13, düğüm-26) olan (her harmonik derecesi için) toplam 5 ölçüm ile harmonik kaynak yerinin tespit edildiği görülmüştür.

30-baralı IEEE test sisteminde deri etkisi göz önüne alınmamıştır. Geliştirilen yöntem devre empedans matrisi ile topolojisine bağlı olduğundan deri etkisinin empedans değerlerine katıl-

ması sadece empedans değerlerini değiştirmektedir ama yöntemin performansını azaltmamaktadır.

Önerilen yer saptama yöntemi, harmonik kaynağının değerinden bağımsızdır. Geliştirilen ÖEYY yaklaşımı ile sınırlı sayıda ölçü aleti kullanılarak ve ölçüm alınan düğümlerdeki gerilim oranı ile empedans oranı karşılaştırılarak harmonik kaynağı yerinin bulunması sağlanmıştır.

ÖEYY yaklaşımının doğruluğunun Monte Carlo yöntemi ile irdelenmesi

Yapılan analizler sonucunda harmonik empedans matrisinde değişim olmadığında, ÖEYY ile bulunan ölçüm yerlerinin harmonik kaynak yeri bulmayı sağladığı görülmüştür. Fakat harmonik empedans değerleri her zaman doğru olarak elde edilemeyebilir ve bu durumlarda da kaynak yeri bulma algoritmasına uygun ölçüm yerlerini verecek bir ölçü aleti bulma yöntemi geliştirilmiş olmalıdır. Bu bölümde ÖEYY yönteminin Monte Carlo yöntemi (MCY) ile irdelenmesi yapılarak ÖEYY'nin bu tür durumda beklenen davranışı gösterip göstermediği incelenmiştir.

n -düğümlü bir devreye harmonik kaynağı bir düğümden enjekte edilmiş olsun. Bu durumda devre denklemi

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}_{bara} \mathbf{I}. \quad (13)$$

Harmonik empedans matrisinde değişim olduğunda ise Denklem 13,

$$\mathbf{V}' = \mathbf{Z}'_{bara} \mathbf{I} \quad (14)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemlerde \mathbf{I} akım vektörü, \mathbf{V} tahmin edilen (hesaplanan) gerilim vektörü, \mathbf{V}' gerçek (ölçülen) gerilim vektörü, \mathbf{Z}_{bara} tahmin edilen empedans matrisi, \mathbf{Z}'_{bara} gerçek empedans matrisi olmak üzere; \mathbf{Z}_{bara} bir δ rasgele değişkeninin her elemanına eklenmesi ile değişime uğramıştır. δ değişkeni, ortalaması μ ve standart sapması σ olan normal bir dağılımdan üretilen bir gerçek sayıdır.

δ değişkeni, Y_C (kapasitif bir elemanın admittansı) ve Y_{RL} (rezistif-endüktif bir elemanın admittansı) büyüklüklerine eklendiğinde,

$$\begin{aligned} Y'_C &= j(\omega C + \delta) \\ Y'_{RL} &= \frac{1}{R + \delta + j(\omega L + \delta)} \end{aligned} \quad (15)$$

elde edilir ($\omega = 2\pi f$ rad/sn). Admittans matrisi \mathbf{Y}'_{bara} , Denklem 15 kullanılarak oluşturulur ve bu matrisin tersi alınarak \mathbf{Z}'_{bara} hesaplanır.

Monte Carlo benzetimlerinde, üretilen rasgele sayıların yaklaşık olarak %68' i $\mu - \sigma$ ile $\mu + \sigma$ arasında değişmektedir. Örneğin, harmonik derecesi 1 ve standart sapma 10^{-3} olmak üzere ortalaması 0.0192 pu olan R için dağılım 0.0182 pu ile 0.0202 pu arasında olacaktır. Benzer olarak, ortalaması 0.0575 pu olan X için dağılımlar 0.0565 pu ile 0.0585 pu arasında olacaktır.

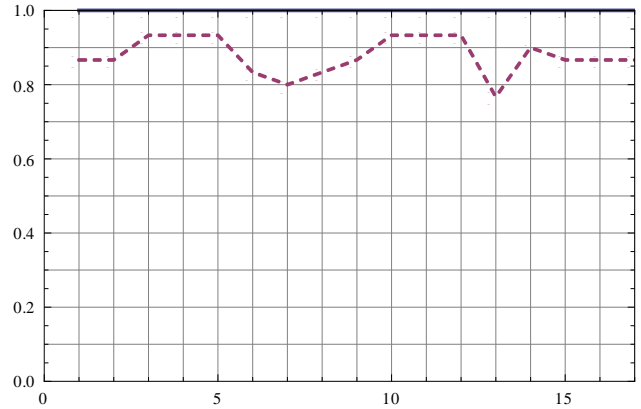
ÖEYY yaklaşımının başarımını ölçmek amacıyla bu yaklaşım bir ölçü aletlerinin en kötü yerleştirilmesi yöntemi (ÖKYY) ile karşılaştırılmıştır. ÖKYY yönteminin ÖEYY'den farkı, Denklem 11 ile elde edilen en küçük mesafeler arasında en büyüğünü aramak yerine en küçüğünü aramasıdır. Bu şekilde birbirine en yakın empedans oranlarını içeren empedans oran kümesi olan $\alpha^{k,\ell}$ seçilmiş olacaktır. Bu kümeye ait ölçüm çifti en kötü ölçüm çiftidir. Sonuç itibarıyla, harmonik empedans matrisi değişime maruz kaldığında ÖKYY ile en kötü kaynak yeri saptama performansı elde edilecektir. Ölçü aletlerinin keyfi yerlere yerleştirilmesi durumunda ise yer saptama performansı ÖEYY ile ÖKYY arasında olacaktır.

Monte Carlo yöntemi ile performans karşılaştırma için öncelikle \mathbf{Z}_{bara} hesaplanır. Daha sonra ÖEYY ve ÖKYY ile elde edilen ölçüm çiftleri için ayrı olarak $\alpha^{k,\ell}$ empedans oran kümeleri bulunur. Ortalaması sıfır ve standart sapması 10^{-10} ile 10^{-1} arasında 10^{-1} adımlarla değiştirilen δ rasgele değişkeninin her σ değeri için N iterasyonla N adet \mathbf{Z}'_{bara} elde edilir. Harmonik kaynağı tüm devre düğümlerine ayrı olarak en-

jekte edilerek Denklem 14 ile gösterilen \mathbf{V}' hesaplanır. Bundan sonra ÖEYY ile elde edilen ölçüm çiftlerine karşılık gelen ve Denklem 8 ile gösterilen oran bulunur. Bu oran daha önce bulunan $\alpha^{k,\ell}$ ile karşılaştırılarak kaynak yeri saptanır. Eğer çıkan sonuç kaynağın bulunduğu düğüme eşitse ilgili sayaç bir arttırılır. Aynı işlem ÖKYY için de gerçekleştirilir. Bu işlemlerin sonucunda iki yöntemin sayaçları karşılaştırılarak başarımlar ölçümü yapılır.

Yukarıda açıklanan MCY ile başarımlar değerlendirme işlemi 30-baralı IEEE test sisteminde denenmiştir. Yapılan analizlerde harmonik kaynağı $h = 6k \pm 1$ ve $k = 1, 2, 3, \dots, 8$ olarak ele alınmıştır. Temel frekans da analize eklenmiştir.

Şekil 4, ÖEYY ve ÖKYY yaklaşımlarının empedans değerlerinde bir değişim olmadığı haldeki karşılaştırmasını sunmaktadır. Burada x-ekseni harmonik derecesine karşılık gelmekte ve y-ekseni ise performans maksimum sayaç değerine (30-düğümlü devre için 30) göre normalize edilmiş değerleri göstermektedir. Şekil 4' te düz çizgi ile gösterilen grafik ÖEYY, kesikli çizgi ile gösterilen grafik ise ÖKYY'ye karşılık gelmektedir.

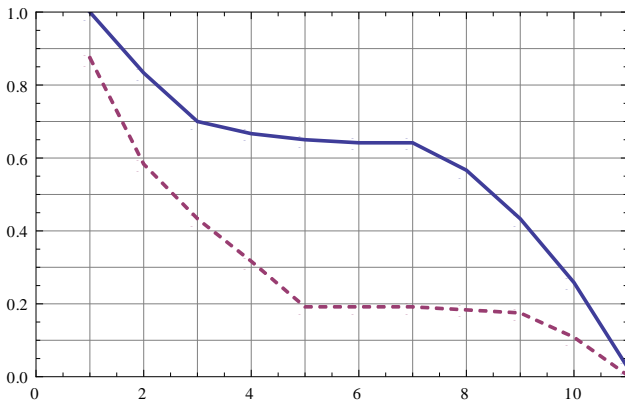


Şekil 4. Empedans değerlerinde değişim olmadığında ÖEYY ile ÖKYY arasında performans karşılaştırması

Şekil 4'ten görüldüğü gibi, önerilen ÖEYY tüm harmonik derecelerinde kaynağı 30 düğümden doğru olarak saptamıştır. En kötü durumu içeren ÖKYY ise bazı harmonik derecelerinde tam başarımla sağlayamamıştır. Sonuç olarak ÖEYY

yaklaşımının çok başarılı olduğu ortaya çıkmaktadır.

Şekil 5'te ise harmonik empedans matrisi, ortalaması sıfır ve standart sapması σ olan δ rasgele değişkeninin her σ değeri için değişimine maruz kaldığında yapılan performans karşılaştırmasını göstermektedir. Burada x -ekseni, harmonik empedans matrisindeki değişme miktarıdır. Standart sapma σ , ($x=1$ den 11 ' e kadar olmak üzere) 0 ile 10^{-1} arasında değer almaktadır. Örneğin $x=1$ için standart sapma 0 , $x=2$ için 10^{-10} ve $x=11$ için 10^{-1} değerlerini almaktadır. Şekil 5'te y -ekseni ise ÖEYY ile ÖKYY için normalize edilmiş ortalama performans değerlerini göstermektedir. Bu değerler δ 'nın her değeri için elde edilen ÖEYY ile ÖKYY grafiklerinin x -ekseni boyunca ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 5'te düz çizgi ile gösterilen grafik ÖEYY, kesikli çizgi ile gösterilen grafik ise ÖKYY'ye karşılık gelmektedir.



Şekil 5. ÖEYY ile ÖKYY arasında performans karşılaştırması

Şekil 5'ten görüldüğü gibi harmonik empedans matrisinde değişme olmadığında ÖEYY performansı ÖKYY'den %12.5 daha iyidir. Bununla birlikte, diğer tüm analizler için ÖEYY yaklaşımı ÖKYY'den daha başarılı sonuçlar vermektedir. Şekil 5'ten, ölçüm yerlerinin keyfi alınması durumunda elde edilecek sonuçların iki grafik arasında çıkacağı sonucu da elde edilebilir.

ÖEYY'de kullanılan maksimum değer işlevi, yöntemin yer saptama performansını (empedans değerlerinde değişme olması halinde) arttırmak-

tadır. Şekil 5 incelendiğinde, standart sapmanın arttırılması durumunda empedans matrisindeki hatanın (empedans matrisinin tahmin hatasının) artması sebebiyle ÖEYY'nin başarımının azaldığı görülmektedir. Fakat ÖEYY başarımı her zaman keyfi ölçü aleti seçimine göre daha yüksektir. Bu irdeleme ile ÖEYY'nin devre empedans matrisindeki değişimlerin üstesinden gelme yeteneğine sahip olduğu görülmüştür.

Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Geliştirilen mesafe ölçütü ile iki taraftan beslenen devre topolojilerinde, sistem empedansının bilinmesi halinde ve iki uç noktadan gerilim ölçümü alarak kaynak yeri bulunabilmektedir. Yöntem, harmonik kaynağı hakkında bilgi (harmonik kaynak empedansı ve akımı) gerektirmemektedir. Devredeki dal sayısı arttırıldığında dal sayısı kadar ek ölçüm (her dalın uç noktasında) alınması gerekmektedir. n -düğümlü ve m -dallı bir sistemde kaynak yerini belirlemek için m -ölçüm (her ölçüm her dalın uç düğümünde) alınmalıdır. Dal sayısının artması mesafe ölçütünün tanımlanmasını zorlaştırdığından yöntemin uygulanması iki taraftan beslenen sistemlerle sınırlandırılmıştır.
- Düğüm analizi yaklaşımı kullanılarak n -düğümlü, m -dallı bir devrede kaynak yeri, harmonik akım vektörü incelenerek saptanabilir. Eğer tüm düğüm gerilimleri ve admittans matrisi bilinirse akım vektöründe harmonik kaynağının enjekte edildiği düğüme ait satırda sıfırdan farklı bir değer bulunur ve harmonik kaynak yeri saptanabilir. Bununla birlikte, tüm düğüm gerilimlerinin bilinmesi pratik olmadığından sınırlı ölçüm ile harmonik kaynağı saptayabilen bir yaklaşım ihtiyacı duyulmaktadır.
- Geliştirilen ölçü aleti en iyi yerleştirme ve empedans tabanlı kaynak yeri bulma algoritması, devrede harmonik empedans matrisinde değişme olması halinde bile kaynak yerini bulabilmektedir. Geliştirilen ölçü aleti yerleştirme yöntemi ile elde edilen yer saptama başarımının keyfi yer seçimine göre üstün olduğu görülmüştür.

- Empedans oranı tabanlı kaynak yeri bulma algoritması, mesafe ölçütü yaklaşımının genellenmiş halidir. Mesafe ölçütü yaklaşımında harmonik kaynağı ile ölçü aletlerinden birinin bağlı olduğu düğüm arasındaki mesafe, empedans oranı kullanılarak bulunmaktadı. Empedans oranı tabanlı kaynak yeri bulma yaklaşımında ise gerilim oranı ile empedans oran kümesi karşılaştırılarak kaynak yeri aranmaktadır.
- Bu çalışmada önerilen ÖEYY tabanlı kaynak yeri bulma yaklaşımı ile birden fazla harmonik derecesi içeren bir harmonik kaynağı, toplamsallık ilkesi kullanılarak her harmonik derecesindeki eşdeğer devre ayrı ayrı çözülerek saptanabilir.
- Önerilen yeni yöntem farklı harmonik taşıyan birden fazla kaynak yerini de tespit edebilecek niteliktedir. Ancak, yöntem aynı harmonik bileşenlerini taşıyan iki veya daha fazla kaynağın yerini bulma açısından yetersizdir. Sistemdeki birden fazla harmonik kaynaklarının her biri diğer kaynakların olmadığı en az bir harmonik bileşenini sisteme enjekte ediyorsa, geliştirilen yöntemle bu kaynakların yeri bulunabilir.

Semboller

Z_h	: Hat empedansı
l, d	: Mesafe
V_{S_h}	: S barası harmonik gerilimi
V_{R_h}	: R barası harmonik gerilimi
I_{S_h}	: Hat-1'de ölçülen harmonik akım
I_{R_h}	: Hat-2'de ölçülen harmonik akım
Z_{TOP}	: Toplam hat empedansı
V_S	: S barası düğüm gerilimi
V_R	: R barası düğüm gerilimi
I_S	: Hat-(0),(1)'de ölçülen akım
I_R	: Hat-(n-1),(n)'de ölçülen akım
\mathbf{I}_h	: Harmonik akım vektörü
\mathbf{Y}_h	: Harmonik admitans vektörü
\mathbf{V}_h	: Harmonik gerilim vektörü
$V_i^{(h)}$: i-barasındaki gerilim fazörü
$I_i^{(h)}$: i-barasına net akım fazörü

$\mathbf{Z}_{bara}^{(h)}$: Harmonik empedans matrisi
(k, ℓ)	: Ölçüm çifti
$\alpha^{k, \ell}$: Empedans oran kümesi
\mathbf{V}	: Hesaplanan gerilim vektörü
\mathbf{V}'	: Ölçülen gerilim vektörü
\mathbf{Z}_{bara}	: Hesaplanan empedans matrisi
\mathbf{Z}'_{bara}	: Ölçülen empedans matrisi
δ	: Rasgele değişken
μ	: Ortalama
σ	: Standart sapma
h	: Harmonik derece

Kaynaklar

- Baghzouz, Y., Burch, R.F., Capasso, A. ve Cavallini, A., (1998). Time-varying harmonics: Part I – Characterizing measured data, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **13**, 3, 938-944.
- Beides, H.M. ve Heydt, G.T., (1991). Dynamic state estimation of power system harmonics using Kalman filtering methodology, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **6**, 4, 1663-1669.
- Cataliotti, A., Cosentino, V. ve Nuccio, S., (2008). Comparison of nonactive powers for the detection of dominant harmonic sources in power systems, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **57**, 8, 1554-1561.
- CIGRE 36.05/ CIRED 2 Joint WG CC02, (1999). Review of methods for measurement and evaluation of harmonic emission level from an individual distorting load, CIGRE (Voltage Quality), 791-800.
- Cristaldi, L. ve Ferrero, A., (1995). A digital method for the identification of the source of distortion in electric power systems, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **47**, 1, 1335-1340.
- Cristaldi, L., Ferrero, A. ve Salicone, S., (2002). A distributed system for electric power quality measurement, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **51**, 4, 776-781.
- Emmanuel, A.E., (1995). On the assessment of harmonic pollution, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **10**, 3, 1693-1698.
- Farach, J.E., Grady, W.M. ve Arapostathis, A., (1993). An optimal procedure for placing sensors and estimating the locations of harmonic sources in power systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **8**, 3, 1303-1310.
- Gürsoy, E. ve Niebur, D., (2009). Harmonic load identification using complex independent component analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **24**, 1, 285-292.

- Hartana, R.K. ve Richards, G.G., (1993). Constrained neural network-based identification of harmonic sources, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **29**, 1, 202-208.
- Heydt, G.T., (1989). Identification of harmonic sources by a state estimation technique, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **4**, 1, 569-576.
- Hong, Y.Y. ve Chen, Y.C., (1999). Application of algorithms and artificial-intelligence approach for locating multiple harmonics in distribution systems, *IEE Proceedings for Generation, Transmission and Distribution*, **146**, 3, 325-329.
- IEEE Standard 519, (1992). *IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems*, USA.
- IEEE Standard 1459, (2000). *IEEE trial-use standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, non sinusoidal, balanced or unbalanced conditions*, USA.
- Kezunovic, M. ve Drazenovic, B., (1999). *Fault location*, 11, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering.
- Korovkin, N., Balagula, Y., Adalev, A. ve Nitsch, J., (2005). A method of a disturbance source localization in a power system, *IEEE Power Techonologies Conference*, 1-6, Russia.
- Kumar, A., Das, B. ve Sharma, J., (2005). Simple technique for placement of meters for estimation of harmonics in electric power system, *IEE Proceedings for Generation, Transmission and Distribution*, **152**, 1, 67-78.
- Najjar, M. ve Heydt, G.T., (1991). A hybrid nonlinear-least squares estimation of harmonic signal levels in power systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **6**, 1, 282-288.
- Phadke, A.G., (1993). Synchronized phasor measurements in power systems, *IEEE Computer Applications in Power*, 10-15.
- Xu, W., Liu, X. ve Liu, Y., (2003). An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **18**, 1, 214-219.